第 28 卷　第 2 期　2016年 3 月　腐蚀科学与防护技术　CORROSION SCIENCE AND PROTECTION TECHNOLOGY　Vol.28　No.2　Mar.　2016

专题介绍

合金化及热处理工艺对镁阳极性能影响的研究进展

张万友　刘艇安　郭博闻　付振波　王　嵬

东北电力大学化学工程学院 吉林 132012

摘要:综述了镁基牺牲阳极材料的性能特点,并从组织结构、腐蚀电位、电流效率、晶粒细化等方面探讨了合金元素及热处理对镁阳极腐蚀性能的影响,为镁阳极的发展和研究提供一些思路和参考。

关键词:合金化　热处理　镁阳极

中图分类号:TG172　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1002-6495(2016)02-0179-05

1 前言

金属腐蚀因其带来巨大的经济损失、安全事故等问题,因此有关金属的腐蚀与防护问题受到广泛重视。阴极保护防止金属腐蚀效果显著[1-3],其中牺牲阳极法因具有对临近构筑物干扰小,无需外加电源,保护电流分布均匀,施工简便等优点[4-8],成为阴极保护控制金属腐蚀措施的重要方法之一,并被应用在土壤、淡水及海洋环境金属构筑物的防护中。

目前所应用的牺牲阳极材料主要有,Zn及锌合金、铝合金、镁及镁合金。其中镁阳极的化学活性较高,驱动电位较大,在电阻率较高的环境中运行时,可以提供较大保护电流,因此镁阳极在土壤电阻率较高的地区中应用较为广泛[9]。某些合金元素作为杂质 (如低析氧过电位的元素) 会促进Mg的自溶解,从而降低电流效率。其主要的有效解决措施有合金化,即向镁中添加一定量的合金元素可以减弱杂质元素的不良影响[10];以及热处理工艺,通过改善镁合金中间相的分布状态,提高镁阳极的电化学性能。本文介绍了镁阳极中常见的代表性合金化元素及热处理工艺的研究现状,希望在镁阳极的合金设计方面具有一定的借鉴意义。

2 镁阳极的一般性能

镁阳极的活性高,电极电位较负,是目前常用的驱动电压最大的牺牲阳极材料[11-13]。由于这一特性,相比Al,Zn牺牲阳极,Mg的输出电流大,在淡水或半咸水以及其他电阻率较高的腐蚀介质中可以实现对构筑物更为有效的保护。而镁阳极的高活性和高电势首先使阳极具有更快析氢速率,阳极表面钝化膜破坏,维持了自身活性的同时却增加基体与腐蚀介质的接触;其次,Fe,Ni等杂质元素形成的金属间化合物,在合金内部作为阴极相存在,与基体形成微电偶,且Mg与这些合金元素具有负差异效应[14,15],综合以上两点原因,相比目前应用较为广泛的锌阳极,镁阳极在运行过程中自腐蚀更快,阳极的电流效率低,阳极使用寿命大大缩短[9,16,17] (详见GB/T21448-2008)。为消除或减弱杂质元素的危害,提高镁阳极的电流效率等电化学性能,添加合金元素成为镁阳极研究的主要思路之一。

3 合金化元素对镁阳极的影响

从镁阳极合金化的已有研究可知,镁阳极中合金元素的作用主要有:通过增大镁阳极表面的析氢过电位,降低自腐蚀速率,破坏镁表面因腐蚀产生的钝化膜,减轻镁合金的阳极极化,促进电极持续的活性溶解[18];细化阳极晶粒并降低晶间腐蚀的潜在危害[19];通过形成固溶体或氧化膜,降低有害元素对阳极性能的干扰[20];提高或降低电极电位以保证相应的保护需求[21,22];生成新相,增加力学性能和冶金性能[23]。

3.1 镁阳极的主要合金化元素

Al本身具有比强度高,耐磨性高等优点,且镁阳极中由于Al的存在,其力学性能、电化学性能及耐蚀性能也得以提高。Al主要是以金属间化合物 ($Mg_{17}Al_{12}$) 的形式在镁合金中存在,在镁合金中的作用[9,24-26,42]主要有以下几个方面:(1) 金属间化合物

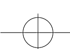
定稿日期:2015-05-25

基金项目:吉林省科技厅科技发展计划项目(20140520100JH和20140204043GX),吉林市科技局指导性科技计划项目 (201467008)和东北电力大学博士科研启动基金项目(BSJXM-201224)资助

作者简介:张万友,男,1957年生,教授,硕士

通讯作者:王嵬,E-mail:wangwei_ustb@126.com,研究方向为材料设计与金属腐蚀

DOI:10.11903/1002.6495.2015.151



($Mg_{17}Al_{12}$) 在镁合金中作为弱的阴极相，与α-Mg基体形成微电偶，促进腐蚀的发生；(2) 镁合金进行固溶和时效等热处理时，$Mg_{17}Al_{12}$相在α-Mg基体的固溶及析出，会对镁合金起到强化作用；(3) 晶界处分布的$Mg_{17}Al_{12}$惰性相对α-Mg基体腐蚀具有阻碍作用；(4) Al存在影响合金表面氧化膜生成。有研究表明，Al的加入可增加镁合金活性，并且是控制镁合金的活化过程的主要元素，该元素的氧化物$Al(OH)_3$会使Mg基体腐蚀生成的$Mg(OH)_2$薄膜发生剥离，以$2Mg(OH)_2 \cdot Al(OH)_3$形式析出，但所产生的活化效果不明显[26]。

Zn具有较高的活性，较负的电位，在镁阳极合金化时，因其在镁合金中与基体及其他合金元素共同作用，从而可以改善镁阳极的综合性能。目前针对含Zn镁合金的研究很多集中高Zn含量的Mg-Zn系(如ZA系列) 以及Zn含量相对较低的Mg-Zn系镁合金 (如AZ系列)。随着Zn含量的变化，镁合金的形貌、硬度和电化学性能等发生改变[27]。王萍等[28]研究了Zn质量分数在0~2%时对Mg-Al-Pb-Zn镁阳极材料组织结构及电化学性能的影响，研究发现，Zn的加入使合金晶粒细化、均匀，其相组成为α-Mg基体、长棒状的β相$Mg_{17}Al_{12}$、颗粒状的MgZn相及Mg_2Pb相，其腐蚀产物 ($Mg(OH)_2$，Al_2O_3，PbO_2及$MgAl_2O_4$) 疏松多孔。随Zn含量增加，合金的自腐蚀速率降低，腐蚀较均匀，放电电位及电流效率提高，析氢速度减慢。Zn含量的不同也会使镁合金析氢程度发生改变，在析氢腐蚀的同时，产生的H_2会破坏合金表面氧化物膜，降低氧化膜对合金的保护[29]。从上可见，随合金系的不同，Zn的作用规律略有差别。

3.2 镁阳极的其它合金化元素

Mn在镁阳极中的主要作用是提高合金的耐蚀性，并可细化晶粒，改善合金焊接性能。Fe杂质存在是镁腐蚀的主要原因之一，合金化Mn可以与Fe形成金属间化合物，并以熔渣的形式排除，从而降低杂质含量，提高镁合金耐蚀性。王跃琪[30]研究了不同含量Mn (0.4%，0.8%和1.2%) 对AZ91合金微观组织和耐蚀性影响，与未添加Mn的合金相比，铸态AZ91合金腐蚀速率分别降低15.8%，55.3%和52.6%；晶粒尺寸分别下降为27.4%，37.8%和36.5%。结果表明，Mn可以细化α-Mg基体相，使$Mg_{17}Al_{12}$相在合金中更加弥散，形成的Al-Mn金属间化合物阻碍腐蚀的发生。而高Mn含量镁合金铸造缺陷明显，晶粒粗化且腐蚀速率增加[30,31]，因此镁阳极进行合金化时选择合适的Mn含量尤为重要。

Ca的添加可以细化镁合金显微组织，显著减少含铝镁合金中$Mg_{17}Al_{12}$相的量，并能在熔融以及在铸造时，大大提高镁合金燃点，改善其铸造性能[32,33]。Harandi等[34]研究表明，随着Ca含量的增加，Mg-xCa二元合金得以细化，且观察到Mg_2Ca相在α-Mg基的分布更均匀，导致硬度增加。在同一溶液中的电化学测量结果表明，由于钙含量的增加，合金内部形成更多微观阴极相Mg_2Ca，导致腐蚀速率更高。从理论上讲，钙的含量的提高，增加了因阴极相的增多而导致的点蚀等局部腐蚀。然而Shamsudin等[35]研究了Ca在Mg-Mn合金的作用发现，Ca含量较低(0.35%) 时，Mg-Mn阳极剖面能发生腐蚀，此时腐蚀电流密度I_{corr}为17.75 A/m^2；当Ca含量为1.11%时，I_{corr}为18.92 A/m^2，腐蚀程度相差不大，因此添加少量钙对Mg-Mn阳极的腐蚀速率影响不明显；而少量钙可以活化钝化膜，进一步促进表面溶解，从而使阳极发生极化，镁阳极开路电位提高。

同为碱土元素的Sr与Ca类似，对改善并细化镁合金微观组织及阻碍腐蚀具有一定的积极效果。Sr的添加可沿晶粒边界形成含Sr金属间化合物，在晶界处产生钉扎，降低镁合金的晶粒尺寸，并改变合金内部其他合金相的分布。微量Sr可以使镁阳极开路电位负移，提高其在运行时的保护性能，同时产生的弱阴极相，阻碍腐蚀的发生，从而提高电流效率[36]。Ibrahimm等[37]在AZ91-0.4 Ca镁合金中添加了0.4% Sr使阳极极化电阻从22.7 Ω·cm^{2}增加到45.2 Ω·cm^2，从而使合金腐蚀速率降低。而且Sr与Ca以及稀土元素有协同作用，使镁合金腐蚀速率进一步降低[38]。

相较上述镁阳极中的合金化元素，稀土元素是比较独特的一类，其主要特点是与Mg形成有限固溶的共晶系，形成的金属间化合物有较高熔点，其合金化的作用有细化晶粒，产生固溶强化，沉淀强化，提高室温强度、高温强度、蠕变抗力，增加耐蚀性能等[39,40]。目前研究和应用较多的是Y，La，Ce等稀土元素。Y可以降低金属液面能，提高合金形核率，与其它稀土元素具有协同作用，改善镁合金腐蚀行为，并提高合金高温抗拉性能及蠕变性能[41,42]。王紫鹏等[43]研究指出，添加稀土Y使镁阳极的晶粒从柱状晶变成树枝晶，晶界面积增大，β相$Mg_{17}Al_{12}$从连续网状分布转变成颗粒状弥散分布，使得镁阳极的开路电位负移，晶粒的大块脱落得到减少，电流效率提高。Y的添加同时也可以减小镁阳极自腐蚀速率，使合金极化曲线阳极分枝发生变化，比基础合金(AZ80) 多了附加台阶，说明稀土Y的加入促进了合金的钝化，且提高了合金的腐蚀电位，降低了腐蚀电

流密度，减小了腐蚀发生的驱动力[44]。Wang等[45]在AZ91中添加Ca(1.5%)和Y(1.0%)，在3.5%NaCl溶液进行测试时发现，添加Ca和Y之后，合金的腐蚀速率最小，其腐蚀速率降低到原试样的16.2%，腐蚀电位升高，同时微观组织更为均匀，因此合金的耐蚀性提高。

Ce的加入可以细化*α*-Mg相，改善第二相的分布与形态，提高合金的腐蚀电位和平衡电位，降低腐蚀电流密度，从而降低了镁合金的腐蚀速率[46,47]。易建龙等[48]在Mg-9Gd-4Y-1Nd-0.6Zr合金中加入少量Ce(小于0.5%)时，在晶界处出现了尺寸变小、分布范围更大的$Mg_{12}Ce$相，以连续网状分布的阴极耐蚀相一定程度阻碍腐蚀发生，与未添加Ce的Mg-9Gd-4Y-1Nd-0.6Zr合金相比，合金的自腐蚀电流密度下降至55.6%，合金的耐蚀性明显增强，且合金晶粒尺寸明显细化。

4 热处理对镁阳极组织及性能的影响

因合金化对合金凝固方式和晶体生长形态所产生的重要影响，以此会引起宏观偏析和微观偏析，并易在局部形成微观腐蚀电池，从而导致合金的耐腐蚀性变差。退火、固溶及时效等热处理工艺可以一定程度上消除镁合金的偏析现象，因此会使镁阳极的电化学性能得以提高。

4.1 固溶处理

固溶处理能使合金中分散在基体周围的析出相回溶，并在后续的冷却过程中重新析出，细小的析出相弥散分布于基体周围，强化固溶体并消除内应力，从而使其具有良好的耐蚀性[49]。

镁铝二元合金的晶界周围分布断网状粗大的*β*相$Mg_{17}Al_{12}$，固溶处理可以使*β*相在*α*-Mg基体中溶解。Tański等[50]研究发现，对于Mg-Al合金来说，Al含量的增加同时也增加了含Al中间相的析出，它们作为新腐蚀核心，从而降低了合金耐蚀性；而经过固溶处理后，减少了含Al中间相的析出，从而提高了合金耐蚀性。Zhang等[51]采用两步分段固溶处理，对均匀化处理后的合金进行进一步固溶处理，可提高Mg-Zn-Al系中三元共晶相的溶解，*α*-Mg基体中溶解的溶质原子和空位的过饱和度增加，且没有微观过热缺陷的形成。然而Hsiao等[52]发现，AZ91D在440 ℃保温20 h后，使*β*相$Mg_{17}Al_{12}$溶解到*α*-Mg基体中，经固溶处理后溶解在*α*-Mg中的高密度*β*相又重新析出，而*β*相的存在阻碍了*α*-Mg相形成氧化膜，从而降低了阳极腐蚀速率。

较低的开路电位可以提高镁牺牲阳极对地下金属结构保护度，并提高其保护面积。Firdaus等[53]的研究发现，镁阳极开路电位随着固溶温度的提高而具有下降趋势，镁阳极在150 ℃下保温8 h并快速冷却，其开路电位最高；而在温度较高的350 ℃并急冷处理时，得到的开路电位值最低。

4.2 时效处理

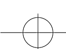
镁合金在时效过程中，第二相沿晶界析出，同时在晶内弥散析出，而晶内存在的细小弥散分布的第二相对腐蚀产物的剥离作用较弱。因而，时效后的镁合金，其电化学活性与铸态合金的电化学活性相比较小，且随时效时间的延长，其电化学活性增加[54]。镁合金的腐蚀速率会随时效热处理的时间发生变化，Song等[55]研究发现，压铸AZ91D镁合金在160 ℃时效，使*α*相中的富铝区中析出*β*相$Mg_{17}Al_{12}$，沿晶界处析出*β*相的体积分数增加，并阻碍了*α*基体的腐蚀。由此可见，腐蚀速率同时效时间的关系是与显微组织和局部成分有密切的相关性。在时效初期，因*β*相的析出，使得随时效时间的延长其腐蚀速率降低；而随时效时间的延长，棒状的*β*相析出渐渐远离晶界处，以此对腐蚀的阻碍作用减弱。相反，*β*相的析出使得铝含量减少，而使得*α*相成为活化态。通过对单一*α*相合金的腐蚀速率的测试，已证实铝含量的减少对腐蚀速率的增加有很重要的作用。因此，压铸AZ91D镁合金中，*α*基体中较低时使得腐蚀易于发生，并且腐蚀速度更快。

4.3 退火处理

微观结构对镁合金的力学性能、电化学性能以及耐蚀性能起到至关重要的作用。铸态镁合金经过退火处理可以改善其内部的组织形态，改善合金元素与第二相的分布状态，消除晶界偏析，从而提高镁合金的力学性能和耐蚀性。张嘉佩[56]研究发现，铸态Mg-Hg-Ga合金经多道热轧工艺和均匀化退火处理后，合金表面电化学差异减小，扩散后的Hg和Ga分布基本均匀，且仅有少量的第二相存在于晶界处，故合金的耐蚀性相较于铸态明显提高。退火处理不仅可以改善镁合金的组织形态，同时也可以通过第二相的形态与分布影响镁合金的放电活性。Wang等[57]研究了热轧和退火处理对AP65镁阳极放电活性的影响，结果表明，退火处理可以减少阻碍放电的*β*相$Mg_{17}Al_{12}$存在，同时由于阴极相Al-Mn颗粒的存在，因此可以提高AP65镁阳极的放电性能。

5 结论

(1) Al，Zn等合金化元素在镁合金中会生成新相，这些相的生成与分布可以一定程度的抑制镁基体相的自腐蚀，改善合金表面钝化膜的状态，提高镁阳极的电流效率。



(2) Mn，Ca，稀土元素 (如Y等) 的主要作用是去除合金中的杂质元素，减少因杂质元素而产生的强阴极相，同时起到细化晶粒的作用，使镁阳极在运行过程中腐蚀更加均匀，减少局部腐蚀脱落，提高运行的稳定性，从而提高镁阳极的耐蚀性和电流效率。

(3) 热处理工艺可以使镁阳极中的合金元素分布均匀，改善相的形状、数量、尺寸及分布状态，减少因成分、组织的不均匀而引起的微观腐蚀电池的形成，从而提高了镁阳极自身的耐蚀性。

参考文献

[1] 中国腐蚀与防护学会. 2011-2012材料腐蚀学科发展报告 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2012

[2] 胡学文, 吴丽蓉, 许崇武等. 外加电流阴极保护用辅助阳极的研究现状及发展趋势 [J]. 腐蚀与防护, 2000, 21(12): 546

[3] 尹鹏飞, 张伟, 许征凯等. 导管架平台外加电流阴极保护技术 [J]. 腐蚀与防护, 2012, 33(2): 18

[4] 吴荫顺, 郑家燊. 电化学保护和缓蚀剂应用技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005

[5] 胡治平, 池华建, 吴强军等. 阴极保护金属防腐技术在电力行业中的应用 [J]. 制冷空调与电力机械, 2005, 26: 74

[6] 王芷芳, 徐连军. 牺牲阳极应用需要重视的若干问题 [J]. 腐蚀与防护, 2011, 32(5): 388

[7] 晋春云, 王瑞召, 张宏杰. 牺牲阳极阴极保护在蛇口燃气管道的应用 [J]. 腐蚀与防护, 2008, 29(7): 410

[8] 孙仁兴, 李良, 孙长坤. 牺牲阳极法阴极保护在南水北调预应力钢筒混凝土管道上的应用 [J]. 腐蚀与防护, 2009, 30(11): 828

[9] 侯军才, 张秋美. 高电位镁牺牲阳极研究进展 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2011, 31(2): 81

[10] 金和喜. 合金元素及固溶处理对AP65镁阳极组织和性能的影响 [D]. 长沙: 中南大学, 2012

[11] 魏宝明. 金属腐蚀理论及应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004

[12] 黎文献. 镁及镁合金 [M]. 长沙: 中南大学出版社, 2005

[13] 万冰华, 费敬银, 王少鹏等. 牺牲阳极材料的研究、应用及展望 [J]. 材料导报, 2010, 24(10): 87

[14] Ghalie E, Winston R. Corrosion Resistance of Aluminum and Magnesium Alloys: Understanding, Performance, and Testing [M]. New Jersey: Wiley, 2010

[15] Bender S, Goellner J, Heyn A, et al. A new theory for the negative difference effect in magnesium corrosion [J]. Mater. Corros., 2012, 63(8): 707

[16] Lu X Y, Zuo Y, Zhao X H, et al. The study of a Mg-rich epoxy primer for protection of AZ91D magnesium alloy [J]. Corros. Sci., 2011, 53: 153

[17] 房中学, 侯军才, 张秋美. 海洋平台用大吨位高电位铸造镁阳极的制备工艺 [J]. 特种铸造及有色合金, 2009, 29(10): 947

[18] 冯艳, 王日初, 彭超群. 海水电池用镁阳极的研究与应用 [J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(2): 259

[19] Benedetti A, Magagnin L, Passaretti F, et al. Cathodic protection of carbon steel in natural seawater: effect of sunlight radiation [J]. Electrochim. Acta, 2009, 54(26): 6472

[20] Song F, Sridhar N. Modeling pipeline crevice corrosion under a disbonded coating with or without cathodic protection under transient and steady state conditions [J]. Corros. Sci., 2008, 50: 70

[21] Xu J, Yao W. Current distribution in reinforced concrete cathodic protection system with conductive mortar overlay anode [J]. Constr. Build. Mater., 2009, 23(6): 2220

[22] Parthiban G T, Parthiban T, Ravi R, et al. Cathodic protection of steel in concrete using magnesium alloy anode [J]. Corros. Sci., 2008, 50(12): 3329

[23] Ma J, Wen J. Corrosion analysis of Al-Zn-In-Mg-Ti-Mn sacrificial anode alloy [J]. J. Alloys Compd., 2010, 496: 110

[24] 张万友, 王鑫焱, 郗丽娟等. 阴极保护技术中牺牲阳极材料的研究进展 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2013, 25(5): 420

[25] Liang S, Ma Y, Chen R, et al. Optimization of heat treatment in AZ64 magnesium alloy [J]. Mater. Tran., 2008, 49(5): 986

[26] Wang N G, Wang R C, Peng C Q, et al. Influence of aluminium and lead on activation of magnesium as anode [J]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2010, 20(8): 1403

[27] 游志勇. 合金化对高锌镁合金组织和性能影响的研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2012

[28] 王萍, 李建平, 郭永春等. Zn对Mg-Al-Pb-Zn系镁阳极材料组织结构及电化学性能的影响 [J]. 硅酸盐学报, 2011, 39(12): 1988

[29] Song Y, Han E-H, Dong K, et al. Effect of hydrogen on the corrosion behavior of the Mg-*x*Zn alloys [J]. J. Mag. Alloys, 2014, 2(3): 208

[30] 王跃琪. AZ91-*x*Mn合金微观组织和耐蚀性能的研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2011

[31] Sajuri Z B, Miyashita Y, Hosokai Y, et al. Effects of Mn content and texture on fatigue properties of as-cast and extruded AZ61 magnesium alloys [J]. Int. J. Mech. Sci., 2006, 48(2): 198

[32] Chen Y, Liu H, Ye R, et al. Effects of the addition of Ca and Sb on the microstructure and mechanical properties of AZ91 magnesium [J]. Mater. Sci. Eng., 2013, A587: 262

[33] Fan J F, Yang C L, Xu B S. Effect of Ca and Y additions on oxidation behavior of magnesium alloys at high temperatures [J]. J. Rare Earths, 2012, 30(5): 497

[34] Harandi S E, Mirshahi M, Koleini S, et al. Effect of calcium content on the microstructure, hardness and in-vitro corrosion behavior of biodegradable Mg-Ca binary alloy [J]. Mater. Res., 2013, 16(1): 11

[35] Shamsudin S R, Rahmat A, Isa M C, et al. Electrochemical corrosion behaviour of Mg-(Ca, Mn) sacrificial anodes [J]. Adv. Mater. Res., 2013, 795: 530

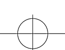
[36] 侯军才, 张秋美, 冯小明等. Mg-Sr牺牲阳极显微组织和电化学性能的研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2007, 27(7): 560

[37] Ibrahim M G, Nabil N G, Ahmed N A. Effect of some alloying elements and heat treatment on the corrosion of AZ91 and ZM60 magnesium alloys [J]. Int. J. Metall. Mater., 2013, 3(2): 21

[38] Chen G, Peng X D, Fan P G, et al. Effects of Sr and Y on microstructure and corrosion resistance of AZ31 magnesium alloy [J]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2011, 21(4): 725

[39] 黄伯云, 李成功, 石力开等. 有色金属材料手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009

[40] 辛明德, 吉泽升. 稀土元素在铸造镁合金中应用的研究现状及其发展趋势 [J]. 中国稀土学报, 2010, 28(6): 643



[41] 徐永东. 稀土镁合金组织和性能研究 [D]. 天津: 天津大学, 2012

[42] 田政, 张德平, 王鸿燕等. 富钇混合稀土对AM60镁合金显微组织与力学性能的影响 [J]. 中国稀土学报, 2008, 26(6): 729

[43] 王紫鹏, 姜丹, 王晓婧等. 稀土Y对AZ63镁牺牲阳极电化学性能的影响研究 [J]. 科技成果专题, 2010, (8): 47

[44] 李高林. 稀土 (Y、Nd) 对AZ80镁合金耐腐蚀性能影响的研究 [D]. 洛阳: 河南科技大学, 2012

[45] Wang F, Li J B, Liu J, et al. The Influence of Ca and Y on the microstructure and corrosion resistance of vacuum die casting AZ91 alloy [J]. Chin. Soc. Met., 2014, 27(4): 609

[46] 刘生发, 刘林艳, 黄尚宇等. 铈对AZ91镁合金腐蚀性能的影响 [J]. 中国稀土学报, 2006, 24(2): 211

[47] 郭锋, 李鹏飞, 高霞等. 铈、钇在AZ91D镁合金中的存在形式及其作用 [J]. 中国稀土学报, 2010, 28(5): 596

[48] 易建龙, 张新明. Ce对Mg-9Gd-4Y-1Nd-0.6Zr合金微观组织和耐蚀性影响 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2012, 32(3): 262

[49] 伍曦耘. 2205双相不锈钢固溶处理工艺研究 [J]. 大型铸锻件, 2009, (4): 16

[50] Tański T, Labisz K, Dobrzański L A. Effect of Al additions and heat treatment on corrosion properties of Mg-Al based alloys [J]. J. Achiev. Mater. Manuf. Eng., 2011, 44(1): 64

[51] Zhang J, Yuan F, Du Y. Enhanced age-strengthening by two-step progressive solution treatment in an Mg-Zn-Al-Re alloy [J]. Mater. Design, 2013, 52: 332

[52] Hsiao H Y, Tsai W T. Effect of heat treatment on anodization and electrochemical behavior of AZ91D magnesium alloy [J]. J. Mater. Res., 2005, 20(10): 2763

[53] Firdaus A M H. The effect of heat treatment on the open circuit potential of magnesium sacrificial anode [J]. Genomics, 1993, 15(2): 458

[54] 王乃光, 王日初, 余琨等. 合金化及热处理对镁合金阳极材料组织及性能的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(1): 38

[55] Song G, Bowles A L, Stjohn D H. Corrosion resistance of aged die cast magnesium alloy AZ91D [J]. Mater. Sci. Eng., 2004, A366: 74

[56] 张嘉佩. 合金元素及热加工工艺对镁阳极组织和性能的影响 [D]. 长沙: 中南大学, 2011

[57] Wang N G, Wang R C, Peng C Q, et al. Effect of hot rolling and subsequent annealing on electrochemical discharge behavior of AP65 magnesium alloy as anode for seawater activated battery [J]. Corros. Sci., 2012, 64: 17

